УДК 621.317.727.1

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОДЕКАДНОГО ИНДУКТИВНОГО ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ MATLAB

В.Л. Ким, В.Н. Дайнаков

Томский политехнический университет
E-mail: sov@camsam.tpu.ru

В системе MATLAB/Simulink построены simulink-модели многодекадного индуктивного делителя напряжения. Приведен алгоритм получения математических моделей одно- и двухдекадного делителей в форме передаточных функций третьего порядка. Погрешность расчета неравномерности амплитудно-частотной характеристики в области верхних частот 20...200 кГц не превышает 20 %.

Основные достоинства индуктивных делителей напряжения (ИДН) как высокоточных мер отношения проявляются при их использовании совместно с другими измерительными, вычислительными и управляющими устройствами, объединяемыми таким понятием как измерительная система [1]. Наиболее характерный режим работы последней – динамический, когда входной сигнал изменяется во времени. Динамическая погрешность измерительной системы зависит от частотного спектра входного сигнала и инерционности ее звеньев. Тогда математическая модель формирования результата измерения должна включать и динамическую модель измерительной системы [2]. Расчет метрологических характеристик системы, состоящей из звеньев, соединенных между собой различными способами, удобно проводить по их передаточным функциям [1]. Заметим, что передаточная функция относится к одной из полных динамических характеристик средства измерения и по ней могут быть найдены частотные характеристики. Как указывалось в [3] для ИДН важнейшей является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), по которой определяется рабочий диапазон частот делителя по заданному значению амплитудной погрешности.

В работе [3] приведен аналитический метод расчета основных точностных характеристик многодекадного ИДН в области верхних частот 20...200 кГц. Несмотря на наглядность полученных выражений амплитудных погрешностей, их практическое использование связано с проведением трудоемких вычислений. Кроме того, анализ точности двухдекадного ИДН проводился без учета влияния входной цепи. Математическое описание последней и ее связей с выходной цепью приводит к выражениям высокого порядка (не менее двадцати пяти) комплексной переменной $s=\sigma+i\omega$. Очевидно, что только переход к машинным методам проектирования позволяет исследовать сложные процессы в ИДН с учетом большого количества влияющих факторов.

Цель данной статьи – получить математическую модель двухдекадного ИДН в форме передаточной функции.

Объектом исследования является двухдекадный делитель, в котором каскады выполняются путем намотки двух делительных обмоток на общем ферромагнитном тороидальном сердечнике [4].

Формализованное описание ИДН возможно по линейной электрической модели (рис. 1), с высокой точностью отображающей частотные характеристики в указанном выше диапазоне частот [5]. Модель состоит из входной и двух выходных цепей. В общей входной цепи элементы $R1$ и $L1$, $R2$ и $L2$ моделируют импедансы коммутационных элементов и соединительных проводов, $R3$ и $L3$ – активное сопротивление и индуктивность рассеяния делительной обмотки первой декады, $R4$ – активное сопротивление потерь в сердечнике, а $L4$ и $C1$ – индуктивность и емкость первой декады. Выходная цепь последней представляет собой многополюсник с отводами $j=\overline{0,10}$ и состоит из последовательно соединенных десяти базовых моделей MT_1–MT_{10}. В этих моделях e_j, r_j, l_{sj}, c_j, представляют собой ЭДС, активное сопротивление провода, индуктивность рассеяния j-ой секции и эквивалентную емкость, шунтирующую эту секцию. Последующая декада моделируется базовыми моделями MT_{11}–MT_{20}, последовательное соединение которых и является второй выходной цепью двухдекадного делителя. Элементы $R5$ и $L5$, $R6$ и $L6$ имитируют импедансы коммутаторов и соединительных проводов, осуществляющих межкаскадную связь. Импеданс нагрузки $Z_н$ подключается к одному из отводов n ($n=\overline{0,10}$) второй декады. Заметим, что в общем случае во входную цепь поступают напряжения от предыдущей декады, что и имитируют источники напряжения U_1 и U_2. Развязка входной цепи от выходных цепей осуществляется при помощи зависимых источников напряжения $U_5=f_1(U_3)$ и $U_6=f_2(U_4)$, где f_1, f_2 – линейные операторы преобразования. Из-за этих развязывающих источников напряжения модель ИДН обладает свойством однонаправленности, т.е. передача сигнала происходит только от входа до выхода. Поэтому учет влияния нагрузки и параметров второй декады производится известным путем их пересчета во входную цепь. При этом изменяются лишь значения элементов $R4$, $L4$ и $C1$.

Дальнейший анализ ИДН проведем при следующих допущениях:

- $U_2=0$, т.е. рассматриваются две старшие декады;
- импеданс нагрузки $Z_н\to\infty$;

– ЭДС секций второй декады в десять раз меньше ЭДС секций первой.

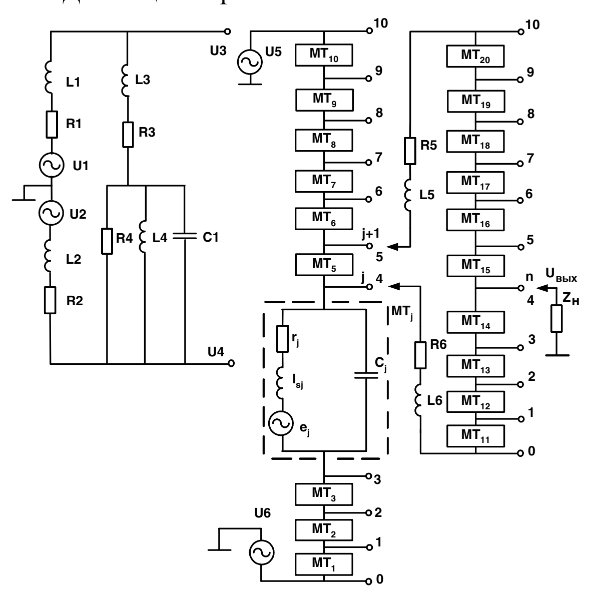


Рис. 1. *Эквивалентная схема двухдекадного ИДН*

Из рис. 1 видно, что порядок системы дифференциальных уравнений, зависящий от количества реактивностей, и, следовательно, передаточных функций для выходных отводов будет не менее сорока семи. Математическая модель в форме передаточной функции (*tf*-модель) такого высокого порядка в вычислительном аспекте плохо обусловлена и численно неустойчива [6]. Причина этих затруднений – высокая чувствительность нулей и полюсов передаточной функции к изменению коэффициентов многочленов и ограниченная разрядность машинного слова. Кроме этого, для анализа работы ИДН в частотной области нет необходимости использования передаточной функции выше третьего порядка [3]. Таким образом, успешное решение поставленной задачи будет зависеть от того, удастся ли упростить полную модель и определить вносимые при этом погрешности моделирования.

Редукция полной эквивалентной схемы базируется на следующих обстоятельствах. Во-первых, нагрузка $Z_н$ подключается только к одному из выходных отводов *n* второй делительной обмотки. Во-вторых, вторая декада подключается только к двум выходным отводам *j*, *j*+1 первой делительной обмотки. Заметим, что номера отводов декад определяются номинальным значением устанавливаемого коэффициента передачи [3]: $K_{j,n}$=0,1*j*+0,01*n*, где j_{max}=9.

В этом случае не рассчитываются выходные напряжения для других отводов декад. Тогда каждую из декад можно представить упрощенной моделью – макромоделью (МКМ). МКМ представляет собой простую модель, содержащую минимально необходимое количество базовых моделей в выходной цепи. МКМ построим заменой совокупности последовательно соединенных моделей MT_1–MT_j и MT_{j+2}–MT_{10} эквивалентными им базовыми моделями MT_{21} и MT_{22}, а MT_5 на MT_{j+1} (рис. 2). Во второй декаде модели MT_{11}–MT_n, где MT_n=MT_{14}, заменяются на MT_{23}, а MT_{n+1}–MT_{20} на MT_{24}.

Параметры элементов эквивалентной базовой модели макромодели, включенной между любыми отводами *k*, *m* (*k*<*m*) делительной обмотки, например, первой декады выражаются через параметры базовых моделей полной модели следующим образом:

$$e_{k,m} = \sum_{j=k+1}^{m} e_j, \quad r_{k,m} = \sum_{j=k+1}^{m} r_j, \quad l_{sk,m} = \sum_{j=k+1}^{m} l_{sj},$$

$$c_{k,m} = (k-m)^{-2} \sum_{j=k+1}^{m} c_j.$$

Заметим, что для второй декады в этих формулах необходимо заменить индекс *j* на *n*.

В работе [7] приведены параметры макромоделей первой декады, а в табл. 1 – макромоделей второй декады для различных коэффициентов передач при идентичных параметрах секций e_n=e_0, r_n=r_0, l_{sn}=l_{s0} и среднем значении межпроводной емкости C_0. Заметим, что ввиду симметрии выходной цепи полной модели относительно среднего, пятого отвода [7], параметры макромоделей для коэффициентов передач 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 оказываются равными параметрам макромоделей для коэффициента передач 0,9; 0,8; 0,7 и 0,6 соответственно. При этом изменяются лишь номера отводов (указаны в скобках).

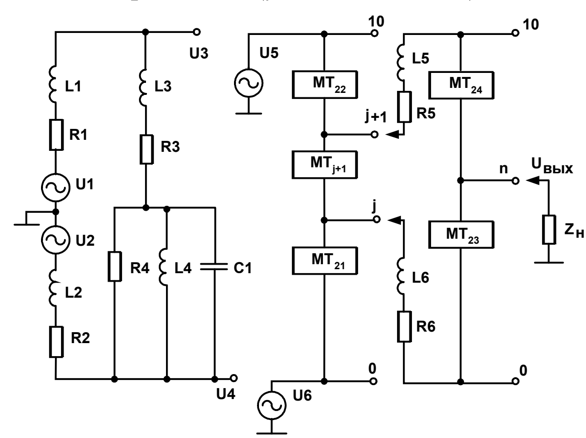


Рис. 2. *Упрощенная эквивалентная схема двухдекадного ИДН*

Как видно из рис. 2, порядок упрощенной модели двухдекадного ИДН равен 17, что почти в три раза меньше, чем у полной модели. Дальнейший путь понижения порядка модели – разбиение многодекадного ИДН на подсхемы. В качестве последней выбираем однодекадный делитель с выходной цепью, содержащей лишь две базовые модели, как в табл. 1. Тогда расчет первой декады осуществляется в два этапа: для отвода *j*, затем для отвода *j*+1. Далее напряжения на этих отводах используются как входные для второй декады.

Таким образом, для расчета многодекадного ИДН достаточно иметь макромодель одной декады и знать характеристики взаимодействия (входной и

Таблица 1. *Параметры упрощенных моделей однодекадного ИДН*

Коэффициент передачи K_n	Параметры эквивалентной базовой модели		Выходная цепь макромодели
	MT_{24}	MT_{23}	
0,1 (0,9)	$e_{1,10}=9e_0$ $r_{1,10}=9r_0$ $l_{s1,10}=9l_{s0}$ $c_{1,10}=1{,}98C_0$	$e_{0,1}=e_0$ $r_{0,1}=r_0$ $l_{s0,1}=l_{s0}$ $c_{0,1}=4{,}5C_0$	10(0) MT_{24} 1 (9) MT_{23} 0(10)
0,2 (0,8)	$e_{2,10}=8e_0$ $r_{2,10}=8r_0$ $l_{s2,10}=8l_{s0}$ $c_{2,10}=2{,}31C_0$	$e_{0,2}=2e_0$ $r_{0,2}=2r_0$ $l_{s0,2}=2l_{s0}$ $c_{0,2}=4{,}25C_0$	10(0) MT_{24} 2 (8) MT_{23} 0(10)
0,3 (0,7)	$e_{3,10}=7e_0$ $r_{3,10}=7r_0$ $l_{s3,10}=7l_{s0}$ $c_{3,10}=2{,}64C_0$	$e_{0,3}=3e_0$ $r_{0,3}=3r_0$ $l_{s0,3}=3l_{s0}$ $c_{0,3}=3{,}94C_0$	10(0) MT_{24} 3 (7) MT_{23} 0(10)
0,4 (0,6)	$e_{4,10}=6e_0$ $r_{4,10}=6r_0$ $l_{s4,10}=6l_{s0}$ $c_{4,10}=2{,}97C_0$	$e_{0,4}=4e_0$ $r_{0,4}=4r_0$ $l_{s0,4}=4l_{s0}$ $c_{0,4}=3{,}63C_0$	10(0) MT_{24} 4 (6) MT_{23} 0(10)
0,5 (0,5)	$e_{5,10}=5e_0$ $r_{5,10}=5r_0$ $l_{s5,10}=5l_{s0}$ $c_{5,10}=3{,}3C_0$	$e_{0,5}=5e_0$ $r_{0,5}=5r_0$ $l_{s0,5}=5l_{s0}$ $c_{0,5}=3{,}3C_0$	10(0) MT_{24} 5 (5) MT_{23} 0(10)

выходной импедансы) декад.

Возможность получения аналитических выражений основных динамических характеристик и в том числе передаточной функции по электрическим моделям позволяет система компьютерной математики MATLAB с пакетом расширения *Simulink* [8]. Далее рассмотрим алгоритм построения математической модели двухдекадного ИДН в форме передаточной функции.

1. Создание *Simulink*-модели однодекадного ИДН

На рис. 3 приведена исходная модель декады ИДН, построенная с использованием библиотеки пакета *Simulink*, входящего в состав MATLAB 6.5. В этой модели элементы входной цепи имеют следующие значения: $R1=R2=0{,}01$ Ом; $R3=1{,}2$ Ом; $R4=10$ кОм; $L1=L2=0{,}01$ мкГн; $L3=11$ мкГн; $L4=4$ Гн; $C1=500$ пФ. Значения элементов выходной цепи получаем из табл. 1 при $r_0=r_{01}=0{,}12$ Ом; $l_{s0}=l_{s01}=1{,}1$ мкГн; $C_0=C_{01}=300$ пФ. Например, для коэффициента передачи первой декады $K_1=0{,}1$ имеем $R7=1{,}08$ Ом; $L7=9{,}9$ мкГн; $C2=594$ пФ; $R8=0{,}12$ Ом; $L8=1{,}1$ мкГн; $C3=1{,}35$ нФ; $R9=R10=10^{-5}$ Ом. Последние элементы, т.е. $R9$ и $R10$, отсутствующие в базовых моделях MT_{23}, MT_{24}, необходимы для обеспечения запуска *Simulink*-модели на моделирование. Как показали машинные эксперименты, столь малые значения сопротивлений не влияют на результаты моделирования. Кроме *R*, *L*, *C* элементов в *Simulink*-модели используются следующие блоки: управляемые источники напряжения (*Controlled Voltage Source*) *CVS*0–*CVS*5, измерители напряжений (*Voltage Measurement*) *VM*0–*VM*2, умножители (*Gain*) *G*1 со множителем 0,9 и *G*2 со множителем 0,1. Для проверки работоспособности модели к низкопотенциальному (узел 0) и высокопотенциальному (узел 1) входам подключаются источники синусоидального сигнала (*Sine Wave*) *SW*, имитирующие выходные напряжения предыдущей декады (рис. 1). Если моделируется первая, старшая декада, то $U_2=0$ и узел 0 заземляется. Тогда в *simulink*-модели используется только один источник входного напряжения как показано на рис. 3. Наблюдение выходного сигнала осуществляем с помощью вольтметра *VM*3 и осциллографа (*Scope*). Настройка параметров всех блоков производится стандартно [9]. Далее сохраняем созданную *Simulink*-модель под именем ***ivd01.mdl*** и задаем параметры моделирования. Для этого в меню ***Simulation/Simulation parameters/Solvers*** устанавливаем следующие первостепенные данные: ***Start time – 0.0; Stop time – 1.0; Type – Variable-step, ode 23 tb* [*stiff /TR-BDF 2*]**. Следует обратить внимание на последнюю опцию (метод решения дифференциальных уравнений). Как показали машинные эксперименты, только метод ***ode 23 tb*** позволяет осуществить моделирование разработанной *Simulink*-модели ИДН.

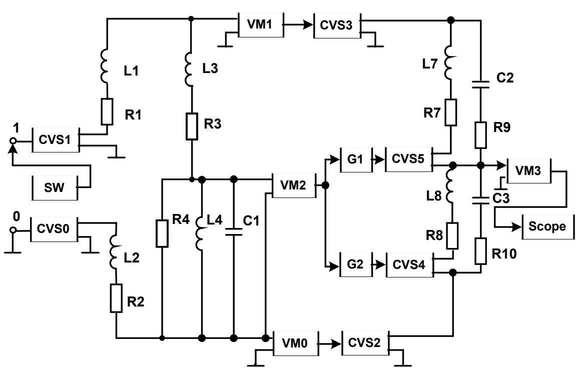


Рис. 3. *Simulink-модель однодекадного ИДН*

После запуска модели кнопкой ***Start Simulation*** результаты работы можно наблюдать в окне осциллографа в виде сигнала синусоидальной формы с амплитудой в десять раз меньшей амплитуды входного сигнала и той же частоты. Убедившись в правильности работы *Simulink*-модели, переходим к следующему этапу решения поставленной задачи.

2. Получение передаточной функции

Для получения передаточной функции, построенной выше модели, воспользуемся функциями расширений MATLAB – функцией ***power2sys*** и функцией ***tf***. Первая функция позволяет получить непрерывную модель объекта исследования в пространстве состояний. Для этого набираем в командном окне MATLAB

» ivd01ss = power2sys ('ivd01','ss').

После выполнения этой команды получим матрицы *A*, *B*, *C*, *D* для уравнений пространства состояний (ввиду громоздкости выражений здесь не приводим). Далее используем функцию ***tf*** для получения передаточных функций

» ivd01tf = tf(ivd01ss).

В результате выполнения этой команды получим передаточные функции (условные записи): *W*00, *W*01, *W*02, *W*10, *W*11, *W*12, *W*23, *W*33, *W*43, *W*53, где *W*00 – передаточная функция от входа *CVS*0 до выхода *VM*0, *W*01 – передаточная функция от входа *CVS*0 до выхода *VM*1 и т.д. Эти функции представляются в виде отношения многочленов комплексной переменной *s*. Например, для *W*00 имеем следующее выражение

$$W00 = \frac{0,9991s^3 + 3,096e5s^2 + 1,815e14s + 5,49e13}{s^3 + 3,107e5s^2 + 1,815e14s + 5,535e13}.$$

Заметим, что из-за использования измерителей *VM*0–*VM*2 в качестве развязывающих блоков входной и выходной цепей *Simulink*-модели не удается сразу получить искомую передаточную функцию 'вход-выход' *W*13: в командном окне выдается сообщение “***Transfer function from input “U_CVS1” to output “U_VM3”: 0”***.

С целью получения передаточной функции *W*13 создаем модель ИДН из блоков передаточных функций (рис. 4). При создании этой модели использовались блоки *'Transfer Fcn'* раздела ***Continuous***, *'Gain'* и *'Sum'* раздела ***Math*** пакета *Simulink*. Сохраняем эту модель под именем ***ivd01sim***. Следует отметить важную особенность исходной *Simulink*-модели, приведенной на рис. 3. Если источник *SW* подключить к узлу 0, а узел 1 заземлить, то при тех же значениях элементов выходной цепи получим *Simulink*-модель ИДН для выходного отвода *j*=9, т.е. K_9=0,9. Структурная схема будет отличаться лишь передаточными функциями блоков входной цепи.

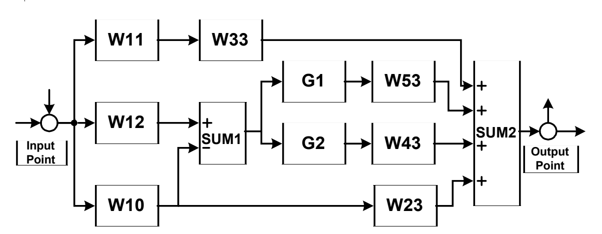


Рис. 4. *Структурная схема однодекадного ИДН*

Таким образом, для моделирования всех десяти отводов ИДН достаточно иметь пять *Simulink*-моделей, отличающихся лишь параметрами элементов выходных цепей макромоделей (табл. 1).

Передаточную функцию 'вход-выход' блочной модели можно получить с помощью специального средства просмотра временных и частотных характеристик модели – ***LTI-Viewer***, входящего в состав пакета *Control System Toolbox* [6, 8]. Для этого необходимо выполнить следующие действия:

- открыть файл ***ivd01sim*** и в меню ***Tools*** выполнить команду ***Linear analysis.*** Результатом является запуск ***LTI-Viewer***;
- в открытом окне ***LTI-Viewer*** выбрать меню ***Simulink*** и выполнить команду ***Get Linearized model***. В результате будет получена линеаризованная модель;
- в окне ***LTI-Viewer*** выполнить команду ***File/Export/Export to Workspace***. В рабочей области MATLAB будет создана структура с именем ***ivd01sim_1*** с матрицами *A*, *B*, *C*, *D* уравнений пространства состояний. Матрицы можно получить следующим образом: » **[*A,B,C,D*] = *ssdata*(*ivd01sim_1*);**
- получить передаточную функцию, набрав в командном окне » ***ivd01t=tf(ss(A, B, C, D))***.

В результате в командном окне появится выражение передаточной функции в виде отношения двух многочленов двадцать пятого порядка.

- понизить порядок модели, т. е. получить редуцированную *rtf*-модель. Вначале формируем сбалансированную реализацию с помощью функции ***balreal*** пакета *Control System Toolbox*. Как показали исследования сбалансированную реализацию можно получить только для моделей не выше девятого порядка. Поэтому в передаточной функции ***ivd01t*** оставляем полиномы только девятого порядка. Новую передаточную функцию запоминаем под именем ***ivd01_9t*** и построим для нее сбалансированную реализацию » **[*ivd01b,g*] = *balreal* (*ivd01_9t*)**.

В результате получаем вектор ***g***, содержащий диагональные элементы результирующего грамиана ***g***=0,2212; 0,2129; 0,0028; 0; 0; 0; 0; 0; 0.

Теперь понижаем порядок модели путем удаления нулевых состояний грамиана с помощью функции modred » ***ivd01r = modred (ivd01b, 4:9, 'del')***.

После выполнения этой функции в командном окне появится выражение искомой передаточной функции

$$W13 = \frac{0,1166s^3 + 2,646e4s^2 + 4,115e12s + 1,301e12}{s^3 + 2,452e5s^2 + 4,115e13s + 1,232e13}.$$

- сравнить нередуцированную и редуцированную математические модели. Загружаем в рабочую среду ***LTI-Viewer*** модели ***ivd01t*** и ***ivd01r*** с помощью функции ***ltiview*** [6, 8]. В меню ***Plot Configurations*** выбираем ***Bode magnitude*** и по графикам АЧХ определяем их неравномерности в области верхних частот (табл. 2). Сравнение результатов проводим по критерию максимального относительного отклонения амплитудных погрешностей в рабочем диапазоне частот $\varepsilon_{1max}=\max|(\gamma_{1t}-\gamma_{1r})/\gamma_{1t}|\cdot 100$ %, где γ_{1t}, γ_{1r} – относительные погрешности коэффициента передачи K_1 моделей ***ivd01t*** и ***ivd01r***.

Таблица 2. *Результаты сравнительного расчета погрешностей полной и редуцированной моделей*

Частота, кГц	Относительная погрешность γ_1, %		Критерий сравнения ε_1, %
	ivd01t	*ivd01r*	
20	–0,010	–0,011	10
50	–0,040	–0,042	5
100	–0,160	–0,170	6
200	–0,650	–0,670	3

Из табл. 2 следует, что ε_{1max}=10 %. Заметим, что для редуцированных моделей (также третьего порядка) всех других выходных отводов ИДН ($j\neq1$) ε_j<9 %. Таким образом, полную модель можно заменить редуцированной с погрешностью не более 10 %.

3. Создание *Simulink*-модели двухдекадного ИДН

Точность многодекадных ИДН снижается при малых уровнях выходного напряжения [3]. Рассмотрим процесс создания модели двухдекадного делителя для коэффициента передачи $K_{j,n}$=0,01. Модель строим на основе схемы, приведенной на рис. 4. В новой модели (рис. 5), сохраненной под именем ***ivd001***, как и в прототипе входная общая цепь отображается блоками с передаточными функциями *W*10, *W*12 и сумматором *SUM*1. Первая декада моделируется блоком с передаточной функцией *W*13. Элементы *R*11, *L*9, *C*4, *R*13 и *R*12, *L*10, *C*5, *R*14 являются компонентами макромодели второй декады, и их значения находим из табл. 1 для K_n=0,1 при $r_0=r_{02}$=0,15 Ом; $l_{s0}=l_{s02}$=0,1 мкГн; $C_0=C_{02}$=20 пФ: *R*11=1,35 Ом; *L*9=0,9 мкГн; *C*4=39,6 пФ; *R*12=0,15 Ом; *L*10=0,1 мкГн; *C*5=90 пФ; *R*13=*R*14=10^{-5} Ом. Передача сигнала с входной цепи в выходную цепь второй декады осуществляется через умножители *G*3, *G*4 с коэффициентами передач 0,09 и 0,01 соответственно и управляемые источники напряжения *CVS*8, *CVS*9. Вторая декада подключается к выходу первой посредством управляющих источников напряжения *CVS*6, *CVS*7. Следует отметить, что для учета взаимовлияния декад в элементы связи *R*5, *R*6, *L*5, *L*6 необходимо включить активную и индуктивную составляющие выходных импедансов отводов j, j+1 первой декады, к которым подключается вторая, т.е.

$$R5=R_{kj+1}+R_{cj+1}+R_{выхj+1},\quad R6=R_{kj}+R_{cj}+R_{выхj},$$
$$L5=L_{kj+1}+L_{cj+1}+L_{выхj+1},\quad L6=L_{kj}+L_{cj}+L_{выхj},$$

где $R_{k(.)}$, $R_{c(.)}$, $R_{вых(.)}$ и $L_{k(.)}$, $L_{c(.)}$, $L_{вых(.)}$ – активные сопротивления и индуктивности коммутационных элементов, соединительных проводов и выходного импеданса.

Составляющие выходного импеданса рассчитываются по формуле [10]

$$Z_{вых\,j}=0,1j(10-j)Z_0,$$

где Z_0 – среднее значение активного сопротивления (r_{01}) или индуктивности рассеяния (l_{s01}) секции первой декады.

Для j=0 $R_{вых0}$=0 и $L_{вых0}$=0, а для j=1 $R_{вых1}=0,9r_{01}$=0,108 Ом и $L_{вых1}=0,9l_{s01}$=0,99 мкГн. Пусть $R_{k0}=R_{k1}=R_{c0}=R_{c1}$=0,05 Ом, а $L_{k0}=L_{k1}=L_{c0}=L_{c1}$= =0,05 мкГн. Тогда *R*5=0,208 Ом, *L*5=1,09 мкГн, *R*6=0,1 Ом, *L*6=0,1 мкГн.

В процессе проверки работоспособности модели результаты моделирования можно наблюдать на экране осциллографа, подключенного к выходу ИДН через вольтметр *VM*4.

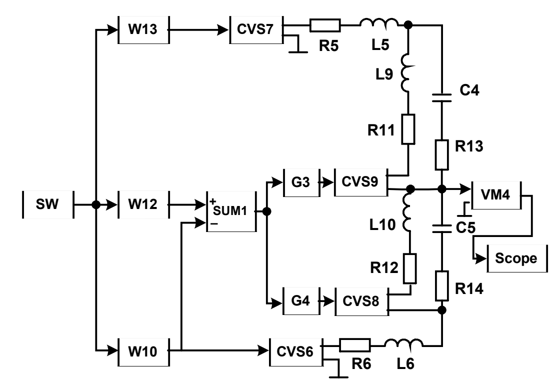


Рис. 5. *Simulink-модель двухдекадного ИДН*

4. Получение передаточной функции двухдекадного ИДН

Как и в п. 2 алгоритма используем функции ***power2sys*** и ***tf***. Получаем передаточные функции *W*64, *W*74, *W*84, *W*94 и создаем модель из блоков передаточных функций (рис. 6). Сохраняем ее под именем ***ivd001sim***. Далее с помощью ***LTI-Viewer*** получаем матрицы *A*, *B*, *C*, *D* уравнений пространства состояний, а затем и передаточную функцию 'вход-выход' двадцать девятого порядка. После понижения порядка с помощью функций ***balreal*** и ***modred*** получаем искомую редуцированную передаточную функцию

$$W14=\frac{0,01113s^3+2354s^2+2,702e11s+1,786e11}{s^3+1,44e5s^2+2,703e13s+8,233e12}.$$

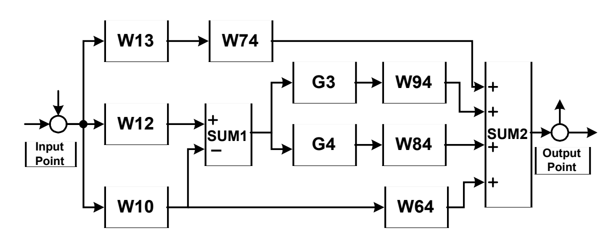


Рис. 6. *Структурная схема двухдекадного ИДН*

5. Оценка качества модели

Качество разработанной модели определяем по одной из основных ее целевых свойств – адекватности. Под адекватностью понимаем степень соответствия модели физическим процессам, протекающим в ИДН. Численная мера адекватности – погрешность модели. Тогда точность модели – характеристика качества модели, отражающая близость ее погрешности к нулю. Погрешность модели может быть оценена по результатам измерений АЧХ реального ИДН и вычислений АЧХ модели. Однако этот метод требует проведения трудоемких натурных экспериментов с использованием прецизионной измерительной аппаратуры. Наиболее просто точность модели можно оценить методом сравнения ее с эталоном. В табл. 3 приведены результаты расчетов на частоте 100 кГц неравномер-

ностей амплитудно-частотных характеристик по редуцированным передаточным функциям и эталонной *PSpice*-модели двухдекадного ИДН, созданной при помощи системы проектирования OrCAD 9.2 [5, 7].

Таблица 3. *Относительная погрешность коэффициента передачи* $\gamma_{j,n}$, *%*

Коэффициент передачи $K_{j,n}$	Тип модели		Критерий сравнения $\varepsilon_{j,n}$, %
	rtf	*PSpice*	
0,01	–0,200	–0,210	5
0,02	–0,110	–0,120	8
0,03	–0,076	–0,083	8
0,04	–0,064	–0,068	6
0,05	–0,054	–0,058	7
0,06	–0,048	–0,052	8
0,07	–0,045	–0,047	4
0,08	–0,049	–0,044	11
0,09	–0,050	–0,043	17

Из табл. 3 следует, что для двухдекадного делителя ε_{2max}=17 % и определяется критерием сравнения $\varepsilon_{j,n}=\varepsilon_{0,09}$ для коэффициента передачи $K_{j,n}$=0,09. Это обусловлено снижением точности средств графического интерфейса ***LTI-Viewer*** [6] при расчете малых отклонений АЧХ и использованием вместо полных моделей редуцированных. Максимальная погрешность последних с учетом погрешности эталонной модели $\varepsilon_э$=3 % [7] равна $\varepsilon_м=\varepsilon_{2max}+\varepsilon_э$=20 %. Такая точность моделей достаточна для большинства практических расчетов, выполняемых при проектировании новых структур и схем многодекадных ИДН.

Таким образом, предложенный в работе алгоритм упрощения эквивалентных схем и создания *Simulink*-моделей позволяет получить математические модели многодекадных ИДН в форме передаточных функций. По этим моделям в системе MATLAB обеспечивается проведение исследований частотных характеристик и выполнение расчетов основных метрологических характеристик делителей с приемлемой точностью. Порядок передаточных функций не превышает трех, поэтому они удобны при моделировании измерительных систем, содержащих ИДН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 8.009-84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 42 с.
2. Назаров Н.Г. Метрология. Основные понятия и математические модели. – М.: Высшая школа, 2002. – 348 с.
3. Ким В.Л. Расчет погрешностей многодекадного индуктивного делителя напряжения // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 6. – С. 121–125.
4. Ройтман М.С., Калиниченко Н.П. Индуктивные делители напряжения // Измерения, контроль, автоматизация: Научно-техн. сб. обзоров ЦНИИТЭИ приборостроения. – М., 1978. – Вып. 2(14) – С. 24–32.
5. Kim V.L., Silushkin S.V., Plotnikov A.N. Mathematical Models and Methods of Multidecade Inductive Voltage Divider Calculation // Proc. of the IEEE. – Siberian Conference on Control and Communications. SIBCON-2003. – Tomsk, Russia, Oct. 1–2, 2003. – P. 98–101.
6. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Control System Toolbox / Под общ. ред. В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. – 287 с.
7. Ким В.Л., Силушкин С.В., Ильин А.Б. Моделирование кодоуправляемых индуктивных делителей напряжения на ЭВМ // Современные техника и технологии: Труды IX междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2003. – Т. 1. – С. 126–128.
8. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 в математике и моделировании. Полное руководство пользователя. – М.: СОЛОН-Прессс, 2003. – 576 с.
9. Анохин В.В. Модели динамических систем: технологии построения в MATLAB // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2003. – № 4. – С. 54–59.
10. Ким В.Л. Расчет выходного импеданса индуктивного делителя напряжения с симметрирующей обмоткой // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 2. – С. 145–148.